

(12)特許協力条約に基づいて公開された国際出願

(19) 世界知的所有権機関
国際事務局(43) 国際公開日
2004年7月15日 (15.07.2004)

PCT

(10) 国際公開番号
WO 2004/059742 A1(51) 国際特許分類:
29/812, 29/201, 21/338, 21/205

H01L 29/778,

浜四丁目5番33号 Osaka (JP). 住化エピソリューション株式会社 (SUMIKA EPI SOLUTION COMPANY, LTD.) [JP/JP]; 〒104-8260 東京都中央区新川二丁目27番1号 Tokyo (JP).

(21) 国際出願番号:

PCT/JP2003/016393

(22) 国際出願日:

2003年12月19日 (19.12.2003)

(25) 国際出願の言語:

日本語

(26) 国際公開の言語:

日本語

(30) 優先権データ:
特願 2002-374549

2002年12月25日 (25.12.2002) JP

(72) 発明者; および

(75) 発明者/出願人 (米国についてのみ): 長田 剛規 (OSADA, Takenori) [JP/JP]; 〒299-0125 千葉県市原市有秋台西1-9-331 Chiba (JP). 井上 孝行 (INOUE, Takayuki) [JP/JP]; 〒299-0245 千葉県袖ヶ浦市蔵波台3-4-18 Chiba (JP). 福原 昇 (FUKUHARA, Noboru) [JP/JP]; 〒305-0035 茨城県つくば市松代3-9-10 Ibaraki (JP).

(71) 出願人 (米国を除く全ての指定国について): 住友化学工業株式会社 (SUMITOMO CHEMICAL COMPANY, LIMITED) [JP/JP]; 〒541-8550 大阪府大阪市中央区北

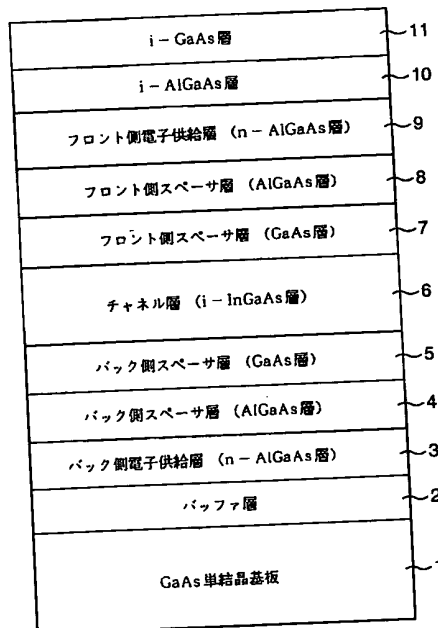
(74) 代理人: 浅村 皓, 外 (ASAMURA, Kiyoshi et al.); 〒100-0004 東京都千代田区大手町2丁目2番1号 新大手町ビル331 Tokyo (JP).

(81) 指定国 (国内): AE, AG, AL, AM, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CN, CO, CR, CU, CZ, DE,

[続葉有]

(54) Title: HIGH ELECTRON MOBILITY EPITAXIAL SUBSTRATE

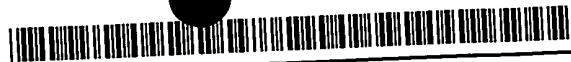
(54) 発明の名称: 高電子移動度エピタキシャル基板



11... i-GaAs LAYER
 10... i-AlGaAs LAYER
 9... FRONTSIDE ELECTRON SUPPLY LAYER (n-AlGaAs LAYER)
 8... FRONTSIDE SPACER LAYER (AlGaAs LAYER)
 7... FRONTSIDE SPACER LAYER (GaAs LAYER)
 6... CHANNEL LAYER (i-InGaAs LAYER)
 5... BACKSIDE SPACER LAYER (GaAs LAYER)
 4... BACKSIDE SPACER LAYER (AlGaAs LAYER)
 3... BACKSIDE ELECTRON SUPPLY LAYER (n-AlGaAs LAYER)
 2... BUFFER LAYER
 1... GaAs SINGLE CRYSTAL SUBSTRATE

(57) Abstract: A compound semiconductor epitaxial substrate which is used for a pseudomorphic high-electron-mobility field-effect transistor and comprises an InGaAs layer as a strained channel layer (6) and AlGaAs layers containing n-type impurities as backside and frontside electron supply layers (3, 9) is disclosed. The strained channel layer (6) is formed to have an emission peak wavelength not less than 1030 nm at 77 K through optimization of the In proportion in the strained channel layer (6) and film thickness.

[続葉有]



DK, DM, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, HR, HU, ID, IL, IN, IS, KE, KG, KR, KZ, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LV, MA, MD, MG, MK, MN, MW, MX, MZ, NI, NO, NZ, OM, PG, PH, PL, PT, RO, RU, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SY, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, YU, ZA, ZM, ZW.

- (84) 指定国 (広域): ARIPO 特許 (BW, GH, GM, KE, LS, MW, MZ, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), ユーラシア特許 (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), ヨーロッパ特許 (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI,

FR, GB, GR, HU, IE, IT, LU, MC, NL, PT, RO, SE, SI, SK, TR), OAPI 特許 (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

添付公開書類:

— 国際調査報告書

2 文字コード及び他の略語については、定期発行される各 PCT ガゼットの巻頭に掲載されている「コードと略語のガイダンスノート」を参照。

(57) 要約: InGaAs 層を歪チャネル層 6、n 型不純物を含有する AlGaAs 層をバック側及びフロント側電子供給層 3 及び 9 とする歪チャネル高電子移動度電界効果型トランジスタに用いられる化合物半導体エピタキシャル基板において、歪チャネル層 6 の In 組成と膜厚との最適化により歪チャネル層 6 の 77 K における発光ピーク波長が 1030 nm 以上となるようにする。

明 細 書

高電子移動度エピタキシャル基板

5 技術分野

本発明は、3-5族化合物半導体からなる歪チャンネル高電子移動度トランジスタ用の化合物半導体エピタキシャル基板及びその製造方法に関する。

背景技術

- 高周波通信機器の重要な構成部品として高電子移動度電界効果型トランジスタ (High Electron Mobility Transistor、以下HEMTという) が用いられている。HEMTは、電子を供給する電子供給層 (ドープ層) と電子が走行するチャンネル層とを異なる材料で構成した選択ドープヘテロ構造を採っている点が大きな特徴である。このヘテロ構造において、電子供給層内のn型不純物から供給された電子は、ヘテロ接合を構成する材料の電子親和力の差によりヘテロ接合界面のチャンネル側に形成されるポテンシャル井戸に溜まり、二次元電子ガスを形成する。このように、電子を供給するn型不純物は電子供給層内にあり、ここから供給される電子は高純度なチャンネル中を走行するようにして、イオン化不純物と電子とを空間的に分離しているため、チャンネル内の二次元電子ガスはイオン化不純物による散乱を受けず、高い電子移動度を示す。

- HEMTは、通常、所定の電子特性を有する各薄膜結晶層を所定の構造を有するようにGaAs単結晶基板上に積層成長させたエピタキシャル基板を用いて作製されているが、チャンネルが高い電子移動度を有するようにするため、HEMT構造を形成する薄膜結晶層を単原子層オーダーで精密に制御することが要求される。したがって、HEMT構造を有するエピタキシャル基板の製造方法としては、分子線エピタキシャル成長法 (Molecular Beam Epitaxy、以下MBE法という) 又は有機金属熱分解法 (Metalorganic Chemical Vapor Deposition、以下MOCVD法という) が従来から用いられている。

これらのエピタキシャル基板の成長方法のうち、特にMOCVD法は、エピタキシャル層を構成する原子種の有機金属化合物又は水素化物を原料として用い、基板上で熱分解させて結晶成長を行う方法であるため、適用可能な物質の範囲が広く、また結晶の組成、膜厚の精密な制御に適しているだけでなく、大量の基板を制御性良く処理できるために、近年広く工業的に用いられるようになっている。

そして、これらのエピタキシャル基板に用いる3-5族化合物半導体材料としては、任意の組成で格子定数を一致させることができ、良好な結晶性を保ちつつ各種ヘテロ接合が可能なことから、GaAs、AlGaAsなどの材料が広く用いられているが、HEMTの高性能化のためにはチャネル層の電子移動度をより高くする必要がある。そのため、最近では、電子輸送特性に優れているだけでなく、In組成に応じてエネルギーギャップを大幅に変えることができ、二次元電子を効果的に閉じ込めることができるなど、ヘテロ接合に用いる3-5族化合物半導体材料として非常に優れた素質を有しているとの理由から、GaAsに代わってInGaAsがチャネル層の材料として用いられている。また、InGaAsに組み合わせる材料としてAlGaAs又はGaAsが知られている。

しかしながら、InGaAsは、GaAsに対する格子整合が不可能であるため、以前は、InGaAsを用いて十分な物性を有するエピタキシャル基板を得ることができなかった。しかし、その後、格子不整合の系であっても弾性変形の限界内であれば転位の発生などの不都合な結晶性の低下を招くことなく、信頼性のあるヘテロ接合が形成可能であることがわかり実用化が行われてきた。

このようなInGaAs層を、従来のHEMTの二次元電子の流れるチャネル層部分に用いた構造のエピタキシャル成長基板を利用することにより、従来に比べて移動度の高い、雑音特性に優れた電子素子が作製されている。InGaAs層を二次元電子の流れるチャネル層に用いたHEMTは、歪チャネル高電子移動度トランジスタ(pseudomorphic-HEMT、以下p-HEMTと称する)と呼ばれている。

このような格子不整合系での歪み結晶層の膜厚の限界値は、歪み結晶層の組成の関数として与えられ、例えばGaAs層に対するInGaAs層の場合では、J. Crystal Growth, 27 (1974) p. 118及びJ.

Crystal Growth, 32 (1974) p. 265に開示されている Matthews' の理論式が知られており、これらの理論式は実験的にも概ね正しいことがわかっている。

特開平6-21106号公報には、これらの理論式で与えられる InGaAs 5 層膜厚の限界値を上限とする範囲を限定したものとして、p-HEMT構造の、チャンネル層に用いられる InGaAs 歪み層の In 組成と InGaAs 層膜厚について、一定の関係式で最適化し、電子移動度を改善する技術が開示されている。

移動度を高めるために、イオン化不純物による二次元電子の散乱を更に小さく 10 することが有効であるので、電子供給層とチャンネル層との間に、電子供給層と同じ材質及び同じ組成ではあるが不純物を添加しない層をスペーサ層として挿入することもある。例えば、第2708863号特許公報には、p-HEMT構造のチャンネル層に用いられる InGaAs 歪み層と n-AlGaAs 電子供給層の間に AlGaAs 層と GaAs 層からなるスペーサ層を挿入し、成長条件を最適化することにより、二次元電子ガス濃度と電子移動度とを改善するようにした構成 15 が開示されている。

InGaAs 歪み層を p-HEMT 構造の電子が走行するチャンネル層に用いる場合、GaAs 層をチャンネル層に用いた HEMT 構造のエピタキシャル基板よりも室温 (300K) での電子移動度を向上させることができる。しかし、これまでも報告されている室温 (300K) での移動度は $8000 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ 程度が 20 最高であり、InGaAs 歪み層をチャンネル層に用いた p-HEMT 構造エピタキシャル基板においても、それを超える電子移動度を達成するのは困難であった。

p-HEMT 構造エピタキシャル基板の電子移動度を上げるため、第2708863号特許公報に開示されている構成を採用する場合には、スペーサ層の膜厚を大きくするに従い電子移動度は大きくなるが、電子供給層とチャンネル層との距離が離れるためにチャンネル層に形成される二次元電子ガス濃度が小さくなり、望ましくない結果を生じる。 25

チャンネル層の電子移動度と二次元電子ガス濃度とを同時に改善するためには、チャンネル層の In 組成を上げ、膜厚を大きくすることが有効である。チャンネル層の In 組成を上げることにより、チャンネル層を移動する電子の有効質量を小さく

して電子移動度を改善し、更に電子供給層とチャネル層の伝導帯エネルギー差を大きくとることができ、二次元電子ガス濃度を大きくすることができるからである。また、チャネル層の膜厚を大きくすることで、二次元電子ガスの励起準位のエネルギーを下げ、二次元電子ガス濃度の向上に効果があることが考えられる。

- 5 しかしながら、InGaAs歪み層のIn組成及びInGaAs膜厚を、InGaAs層の良好な結晶特性を維持したまま上げるのは、GaAs層との格子不整合による転位欠陥発生のために難しい。また、p-HEMT構造エピタキシャル基板における二次元電子ガス濃度と電子移動度の値は、高ければ高いほど電子素子の特性を良好にできるという観点からは、上述した従来技術のいずれにおい

- 10 ても、これらの値はまだまだ満足できるものではなかった。

したがって、電子供給層にn-AlGaAsを用い、チャネル層に歪みInGaAs層を用いたp-HEMT構造エピタキシャル基板において、現在、報告されている値よりも更に高い二次元電子ガス濃度と高い電子移動度を併せ持つエピタキシャル基板の実現が強く望まれていた。

- 15 電子移動度は、電界型トランジスタの重要な性能指標であるオン抵抗、最大電流値又はトランスコンダクタンスといった諸特性を向上させる上で重要なパラメータであることはよく知られている。電子移動度を更に改善することにより、立ち上がり抵抗（オン抵抗）の低減を達成できる。これにより消費電力を低減できるので、バッテリーの使用時間の長期化が可能となる。同時に、発熱量を削減できるので、デバイスの高集積化を可能とし、チップサイズを小さくして、モジュール設計の自由度を高めることもできる。このような観点から、携帯電話等の各種携帯機器に用いられるp-HEMTの場合には、電子移動度のより一層の改善が望まれている。

発明の開示

- 25 本発明者らは、従来技術における上述の問題を解決するために鋭意検討を行った結果、InGaAs歪チャネル層とn型不純物を含むAlGaAs電子供給層とを備えて成るp-HEMTにおいて、InGaAs歪チャネル層における発光ピーク波長がそこでの電子移動度と所定の相関関係を有することを見い出し、本発明をなすに至った。すなわち、InGaAs歪チャネル層の上下に接してG

a A s 層を積層し、その膜厚を一定厚さ以上とすることによりチャネル層の I n 組成を大きくし、チャネル層からの発光波長を 1 0 3 0 n m 以上にすることにより、これまでに報告されたことのない高い電子移動度が実現されたのである。

本発明の第一の態様によれば、I n G a A s 層を歪チャネル層とし、及び n 型不純物を含有する A l G a A s 層を電子供給層として含み、歪チャネル高電子移動度電界効果型トランジスタに用いられる化合物半導体エピタキシャル基板において、前記 I n G a A s 層の 7 7 K における発光ピーク波長が 1 0 3 0 n m 以上である上記化合物半導体エピタキシャル基板が提案される。

本発明の第二の態様によれば、上記第一の態様において、前記 I n G a A s 層の上下に接して、G a A s 層がスペーサ層として設けられている化合物半導体エピタキシャル基板が提案される。

本発明の第三の態様によれば、上記第二の態様において、前記 G a A s 層の膜厚が、それぞれ 4 n m 以上である化合物半導体エピタキシャル基板が提案される。

本発明の第四の態様によれば、上記第一の態様において、前記 I n G a A s 層における 3 0 0 K での電子移動度が $8 3 0 0 \text{ cm}^2 / \text{V} \cdot \text{s}$ 以上である化合物半導体エピタキシャル基板が提案される。

本発明の第五の態様によれば、各化合物半導体の層を有機金属熱分解法 (MOCVD 法) を用いてエピタキシャル成長させることを含む上記第一、第二、第三又は第四の態様の化合物半導体エピタキシャル基板の製造方法が提案される。

20 図面の簡単な説明

図 1 は本発明によるエピタキシャル基板の実施の形態の一例を示す層構造図である。

図 2 は図 1 に示す HEMT 構造における移動度と発光ピーク波長との間の関係を示すグラフである。

25 図 3 は本発明によるエピタキシャル基板の第 1 実施例の層構造図である。

図 4 は本発明によるエピタキシャル基板の第 2 実施例の層構造図である。

図 5 は比較例 1 の層構造図である。

図 6 は比較例 2 の層構造図である。

発明を実施するための形態

以下、図面を参照して本発明の実施の形態の一例につき詳細に説明する。

図1は、本発明によるp-HEMT構造エピタキシャル基板の実施の形態の一例を示す層構造図である。図1において、1はGaAs単結晶基板、2はGaAs単結晶基板1上に形成されたバッファ層である。3はn-AlGaAs層として形成され、n型不純物をドーブしたバック側電子供給層であり、バック側電子供給層3の上には、バック側スペーサ層（AlGaAs層）4及びバック側スペーサ層（GaAs層）5が形成されている。6は二次元電子を流すための二次元電子ガスが形成されるチャンネル層であり、In組成に応じて4nmから13.5nm厚のi-InGaAs層として形成されている。

10 チャンネル層6の上には、GaAs層から成るフロント側スペーサ層7、AlGaAs層として形成されたフロント側スペーサ層8、n-AlGaAs層として形成されたフロント側電子供給層9、アンドープ層（i-AlGaAs層）10及び別のアンドープ層（i-GaAs層）11がこの順序で形成されている。

図1に示すエピタキシャル基板は上記のように形成されているので、バック側電子供給層3からバック側スペーサ層4及び5を介してチャンネル層6へ電子が供給されると共に、フロント側電子供給層9からもフロント側スペーサ層8及び7を介してチャンネル層6へ電子が供給される。この結果、チャンネル層6には、高濃度の二次元電子ガスが形成される。ここで、チャンネル層6のIn組成とこれに上下に接するバック側スペーサ層5及びフロント側スペーサ層7の膜厚とがチャンネル層6内における二次元電子ガス濃度に大きな影響を与えている。二次元電子ガスの移動度を従来に比べて格段に向上させることを目的として、そのIn組成と上下スペーサ層の膜厚との種々の組み合わせについて、チャンネル層6における室温での電子移動度と77Kにおける発光ピーク波長との関係を調べるための測定を行った。その測定結果は下記の通りであった。

チャンネル層の In組成	上下スペーサ 層の膜厚 (Å)	室温での移動度 ($\text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$)	77 Kでの発光 ピーク波長 (nm)
0.20	20	7200	998
0.20	40	7470	997
0.20	60	7790	996
0.30	40	8420	1061
0.30	60	8990	1068
0.35	60	8950	1075
0.40	60	8370	1064

- 10 この測定結果を図2にグラフとして示す。図2から判るように、77 Kにおける発光ピーク波長が1030 nm以上の場合には、電子移動度がこれまでに報告されたことのない8300 ($\text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$) という極めて高い値を示していることがわかる。したがって、図1に示す、i-InGaAs層をチャンネル層とし、n型不純物を含有するAlGaAs層を電子供給層とするp-HEMT構造を有するエピタキシャル基板において、チャンネル層の77 Kにおける発光ピーク波長を1030 nm以上とした場合に、その電子移動度を格段に高くすることができるのである。

図1に示す層構造のエピタキシャル基板を作製する方法について説明する。先ず、GaAs単結晶基板1を用意する。GaAs単結晶基板1は高抵抗の半絶縁性GaAs単結晶基板であり、LEC (Liquid Encapsulated Czochralski) 法、VB (Vertical Bridgman) 法、VGF (Vertical Gradient Freezing) 法等で製造されたGaAs基板が好適であり、いずれの方法で製造された場合であつても、1つの結晶学的面方位から0.05°乃至10°程度の傾きをもった基板を用意する。

- 25 上述の如く用意したGaAs単結晶基板1の表面を、脱脂洗浄、エッチング、水洗、乾燥処理した後、結晶成長炉の加熱台上に載置する。炉内を高純度水素で充分置換した後、加熱を開始する。適度な温度に安定したところで炉内に砒素原料を導入する。GaAs層を成長する際には、続いてガリウム原料を導入する。また、AlGaAs層を成長する際には、砒素原料の導入に加えて、ガリウム原

料及びアルミニウム原料を導入する。InGaAs層を成長する際には、砒素原料の導入に加えて、ガリウム原料及びインジウム原料を導入する。各原料の供給量と供給時間を制御することにより、所望の積層構造を成長させていく。最後に、各原料の供給を停止して結晶成長を停止し、冷却後、図1に示すように積層した
5 エピタキシャル基板を炉内から取り出して結晶成長を完了する。結晶成長時の基板温度は、通常、およそ500℃から800℃である。

図1に示す層構造のエピタキシャル基板は、MOCVD法を用いて作製することができる。MOCVD法を用いることの利点は、エピタキシャル層を構成する原子種の有機金属化合物又は水素化物を原料として用いることができることである。
10 る。

実際には、エピタキシャル成長時の砒素原料として、一般に三水素化砒素（アルシン）を用いることが多いが、アルシンの水素を炭素数が1から4のアルキル基で置換したアルキルアルシンを使用することもできる。ガリウム、アルミニウム、及びインジウムの原料としては、各金属原子に炭素数が1から3のアルキル
15 基又は水素が結合したトリアルキル化物又は三水素化物が、一般に用いられる。

n型ドーパントとしては、シリコン、ゲルマニウム、スズ、硫黄、セレン等の水素化物又は炭素数が1から3のアルキル基を有するアルキル化物を用いることができる。

以下、本発明について、実施例と比較例とを基に詳細に説明するが、本発明は
20 これらの実施例に限定されるものではない。

実施例1

減圧バレル型MOCVD炉を用い、図3に示す積層構造をVGF法半絶縁性GaAs
a As基板上にエピタキシャル成長により作製した。

図3において、11は単結晶基板であるGaAs基板、12～15はいずれも
25 GaAs基板11上に形成されたバッファ層である。ここでは、バッファ層12～15は、それぞれ200nm厚のi-GaAs層、250nm厚のi-Al_{0.25}Ga_{0.75}As層、250nm厚のi-GaAs層及び200nm厚のi-Al_{0.25}Ga_{0.75}As層として形成されている。

16は、4nm厚のn-Al_{0.24}Ga_{0.76}As層として形成され、n型

不純物を $3 \times 10^{18} / \text{cm}^3$ ドープしたバック側電子供給層であり、バック側電子供給層 16 の上には、バック側スペーサ層 17 及び 18 がこの順序で形成されている。ここでは、バック側スペーサ層 17 は 3 nm 厚の $i\text{-Al}_{0.24}\text{Ga}_{0.76}\text{As}$ 層、バック側スペーサ層 18 は 6 nm 厚の $i\text{-GaAs}$ 層となっている。19 は二次元電子を流すための二次元電子ガスが形成されるチャンネル層であり、7.6 nm 厚の $i\text{-In}_{0.30}\text{Ga}_{0.70}\text{As}$ 層である。

20 及び 21 はそれぞれがフロント側スペーサ層である。ここでは、フロント側スペーサ層 20 は 6 nm 厚の $i\text{-GaAs}$ 層、フロント側スペーサ層 21 は 3 nm 厚の $i\text{-Al}_{0.24}\text{Ga}_{0.76}\text{As}$ 層である。

22 はフロント側電子供給層で、10 nm 厚の $n\text{-Al}_{0.24}\text{Ga}_{0.76}\text{As}$ 層であり、 n 型不純物が $3 \times 10^{18} / \text{cm}^3$ の濃度にドープされている。23 及び 24 はいずれもアンドープ層で、それぞれ、3 nm 厚の $i\text{-Al}_{0.22}\text{Ga}_{0.78}\text{As}$ 層、20 nm 厚の $i\text{-GaAs}$ 層である。

3 族元素の原料としては、トリメチルガリウム (TMG) 又はトリメチルアルミニウム (TMI) を用いて、5 族元素の原料としてはアルシンを用いた。 n 型ドーパントとしてシリコンを用い、反応炉内圧力 0.1 atm、成長温度 650 °C、成長速度 $200 \text{ Å} / \text{min} \sim 300 \text{ Å} / \text{min}$ の成長条件でエピタキシャル成長を行った。

電子が走行するチャンネル層 19 には、In 組成 0.30、膜厚 7.6 nm の歪み InGaAs 層をエピタキシャル成長させものを用いた。更に、チャンネル層に用いた InGaAs 層の上下には、スペーサ層としてノンドープ GaAs 層を 6.0 nm ずつエピタキシャル成長させた。

上記のようにエピタキシャル成長させた図 3 の実施例 1 の積層構造において、Van der Pauw 法によるホール測定を行った結果、チャンネル層 19 において、室温 (300 K) での二次元電子ガス濃度は $2.28 \times 10^{12} / \text{cm}^2$ 、室温 (300 K) での電子移動度は $8990 \text{ cm}^2 / \text{V} \cdot \text{s}$ 、77 K での二次元電子ガス濃度は $2.59 \times 10^{12} / \text{cm}^2$ 、77 K での電子移動度は $35600 \text{ cm}^2 / \text{V} \cdot \text{s}$ と、これまでに報告されたことのない良好な値を得た。また、こ

のときの構造において、Alショットキー電極を用いたCV測定を行った結果、残留キャリア濃度が $1 \times 10^{15} / \text{cm}^3$ となるときのピンチオフ電圧は、 -1.93 V であった。

更に、図3の実施例1の積層構造において、 77 K でのPLスペクトルを測定した。チャンネル層19の発光ピーク波長は、 1068 nm であった。

実施例2

MOCVD炉を用いて、図4に示す積層構造のHEMT構造エピタキシャル基板をGaAs基板を用いて作製した。図4に示す層構造は、チャンネル層31のIn組成が0.35でGa組成が0.65であり、且つその膜厚が 5.5 nm である点においてのみ図3に示す層構造と異なっている。したがって、図4の各層のうち、図3の各層に対応するものについては同一の符号を付し、それらの層について詳しい説明を重複して行うのを省略する。

実施例1と同様の条件でエピタキシャル成長した図4の積層構造において、Van der Pauw法によるホール測定を行った結果、チャンネル層31において、室温(300 K)での二次元電子ガス濃度は $2.22 \times 10^{12} / \text{cm}^2$ 、室温(300 K)での電子移動度は $8950 \text{ cm}^2 / \text{V} \cdot \text{s}$ 、 77 K での二次元電子ガス濃度は $2.50 \times 10^{12} / \text{cm}^2$ 、 77 K での電子移動度は $33000 \text{ cm}^2 / \text{V} \cdot \text{s}$ と、良好な値を得た。また、このときの構造において、Alショットキー電極を用いたCV測定を行った結果、残留キャリア濃度が $1 \times 10^{15} / \text{cm}^3$ となるときのピンチオフ電圧は、 -1.75 V であった。

更に、図4の実施例2の積層構造において、 77 K でのPLスペクトルを測定した。チャンネル層の発光ピーク波長は、 1075 nm であった。

比較例1

MOCVD炉を用いて、図5に示す積層構造のHEMT構造エピタキシャル基板をGaAs基板を用いて比較例1として作製した。図5に示す層構造は、チャンネル層19AのIn組成が0.20でGa組成が0.80であり、且つその膜厚が 13.5 nm である点、及びバック側及びフロント側スペーサ層であるi-GaAs層18A及び20Aの膜厚が 2 nm であること、更に、アンドープ層23Aの膜厚が 7 nm である点でのみ図3に示す実施例1の層構造と異なっている。

したがって、図5の各層のうち図3の各層に対応するものについては同一の符号を付し、それらの層についての詳しい説明を重複して行うのを省略する。

実施例1と同様の条件でエピタキシャル成長させた図5の比較例1の積層構造において、Van der Pauw法によるホール測定を行った結果、チャンネル層19Aにおいて、室温(300K)での二次元電子ガス濃度は $2.55 \times 10^{12} / \text{cm}^2$ 、室温(300K)での電子移動度は $7200 \text{ cm}^2 / \text{V} \cdot \text{s}$ 、77Kでの二次元電子ガス濃度は $2.78 \times 10^{12} / \text{cm}^2$ 、77Kでの電子移動度は $21900 \text{ cm}^2 / \text{V} \cdot \text{s}$ であった。これらの値は、従来から報告されている値と同等であった。また、このときの構造において、Alショットキー電極を用いたCV測定を行った結果、残留キャリア濃度が $1 \times 10^{15} / \text{cm}^3$ となる
10 ときのピンチオフ電圧は、 -2.12 V であった。

更に、図5の比較例1の積層構造において、77KでのPLスペクトルを測定した。チャンネル層の発光ピーク波長は、 998 nm であった。

比較例2

15 MOCVD炉を用いて、図6に示す積層構造のHEMT構造エピタキシャル基板をGaAs基板を用いて比較例2として作製した。図6に示す層構造は、チャンネル層31AのIn組成が0.20でGa組成が0.80であり、且つその膜厚が 13.5 nm である点、及びノンドープ層23Aの膜厚が 7 nm である点のみ図4に示す実施例2の層構造と異なっている。したがって、図6の各層のうち
20 図4の各層に対応するものについては同一の符号を付し、それらの層についての詳しい説明を重複して行うのを省略する。

実施例2と同様の条件でエピタキシャル成長させた図6の比較例2の積層構造において、Van der Pauw法によるホール測定を行った結果、チャンネル層31Aにおいて、室温(300K)での二次元電子ガス濃度は $2.19 \times 10^{12} / \text{cm}^2$ 、室温(300K)での電子移動度は $7790 \text{ cm}^2 / \text{V} \cdot \text{s}$ 、
25 77Kでの二次元電子ガス濃度は $2.44 \times 10^{12} / \text{cm}^2$ 、77Kでの電子移動度 $30800 \text{ cm}^2 / \text{V} \cdot \text{s}$ であった。これらの値は、従来から報告されている値と同等であった。また、このときの構造において、Alショットキー電極を用いたCV測定を行った結果、残留キャリア濃度が $1 \times 10^{15} / \text{cm}^3$ となると

きのピンチオフ電圧は、 -1.90 V であった。

更に、図6の比較例2の積層構造において、 77 K でのPLスペクトルを測定した。チャネル層の発光ピーク波長は、 996 nm であった。

- 実施例1、2及び比較例1、2の結果から、p-HEMT構造エピタキシャル
- 5 基板において、InGaAsチャネル層の上下に積層されるGaAs層の膜厚を 4.0 nm 以上とし、チャネル層のIn組成を大きくし、チャネル層のInGaAs層からのPL発光波長を 1030 nm 以上にするにより、室温(300 K)での電子移動度を $8300\text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ 以上とすることができると確認された。
- 10 InGaAsチャネル層の上下に積層されるGaAs層は、その膜厚を大きくすることによりInGaAs層とAlGaAs層での界面の凹凸を低減し、界面凹凸による散乱によって電子移動度が低下することを抑制すると考えられる。同時に、InGaAs層表面でのInの偏析による3次元成長を抑制し、同様に界面での散乱を抑制する効果があると考えられる。更に、VG F基板又はVB基板
- 15 との低転位GaAs単結晶基板を用いると、InGaAs層の臨界膜厚が大きくなることにより、GaAs層との格子不整合による転位欠陥発生が抑制され、InGaAs層の良好な結晶特性を維持したまま膜厚を大きくすることに効果がある。

- チャネル層(InGaAs層)の発光スペクトルのピーク波長は、チャネル層
- 20 のIn組成と、チャネル層の膜厚に依存する。In組成が大きくなるとバンドギャップが小さくなり、ピーク波長は長波長側にシフトする。また、チャネル層の膜厚が大きくなれば励起準位のエネルギーが小さくなり、やはりピーク波長は長波長側にシフトする。したがってチャネル層のIn組成と膜厚とを同時に最適化する評価手段として、発光スペクトルのピーク波長を用いることができる。

- 25 実施例1、2及び比較例1、2のエピタキシャル基板の層構造は、Hall測定による移動度評価、CV測定によるしきい値電圧測定などの二次元電子ガス特性評価のためのテスト構造のためのものである。

FETデバイスの作製のための実際のエピタキシャル基板の層構造では、実施例1、2及び比較例1、2のエピタキシャル基板の層構造の第14層のノンドー

プGaAs層の膜厚を大きくし、更に、ソース電極及びドレイン電極とオーミックコンタクトをとるためのコンタクト層を積層したものとなっている。コンタクト層には、 $3 \times 10^{18} \sim 5 \times 10^{18} / \text{cm}^3$ 程度にシリコンをドーピングしたn-GaAs層を100nm程度積層したものを通常用いる。

- 5 しかし、本発明による移動度向上の効果は、コンタクト層の成長及びFETデバイス作製のためのプロセスにより損なわれることはない。実施例1、2及び比較例1、2のエピタキシャル基板特性評価用テスト構造においてのみならず、FETデバイスのためのエピタキシャル基板構造においても、本発明による移動度向上の効果は有効である。

10 産業上の利用可能性

本発明によれば、電子素子作製時にも有利となるような、これまでに報告されたことのない電子移動度と二次元電子ガス濃度を有するp-HEMT構造エピタキシャル基板を提供することができる。

請求の範囲

1. InGaAs層を歪チャンネル層とし、及びn型不純物を含有するAlGaAs層を電子供給層として含む歪チャンネル高電子移動度電界効果型トランジスタに用いられる化合物半導体エピタキシャル基板において、該InGaAs層の77Kにおける発光ピーク波長が1030nm以上である上記化合物半導体エピタキシャル基板。
2. 前記InGaAs層の上下に接して、GaAs層がスペーサ層として設けられている請求項1記載の化合物半導体エピタキシャル基板。
- 10 3. 前記GaAs層の膜厚が、それぞれ4nm以上である請求項2記載の化合物半導体エピタキシャル基板。
4. 前記InGaAs層における300Kでの電子移動度が $8300\text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ 以上である請求項1記載の化合物半導体エピタキシャル基板。
5. 各化合物半導体の層を有機金属熱分解法(MOCVD)法を用いてエピタキシャル成長させることを含む請求項1、2、3又は4記載の化合物半導体エピタキシャル基板の製造方法。
- 15

FIG. 1

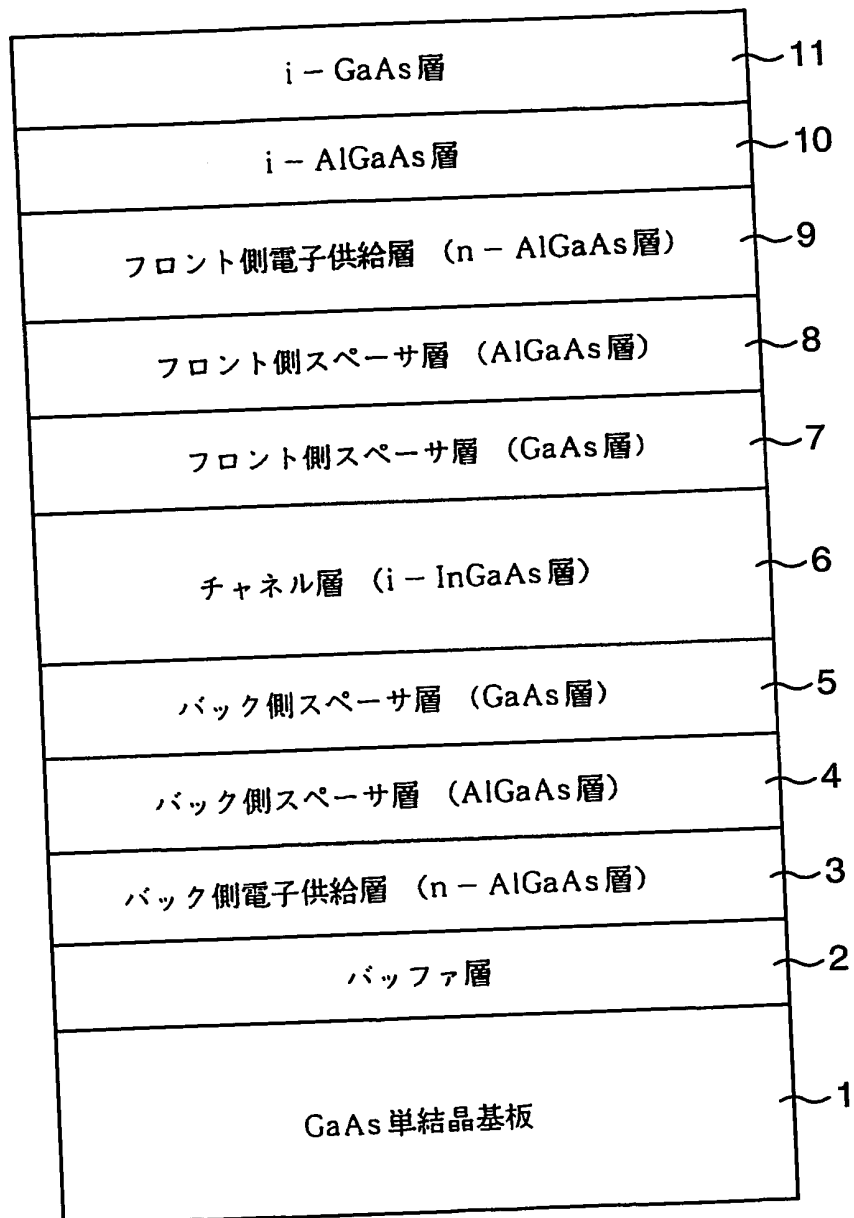
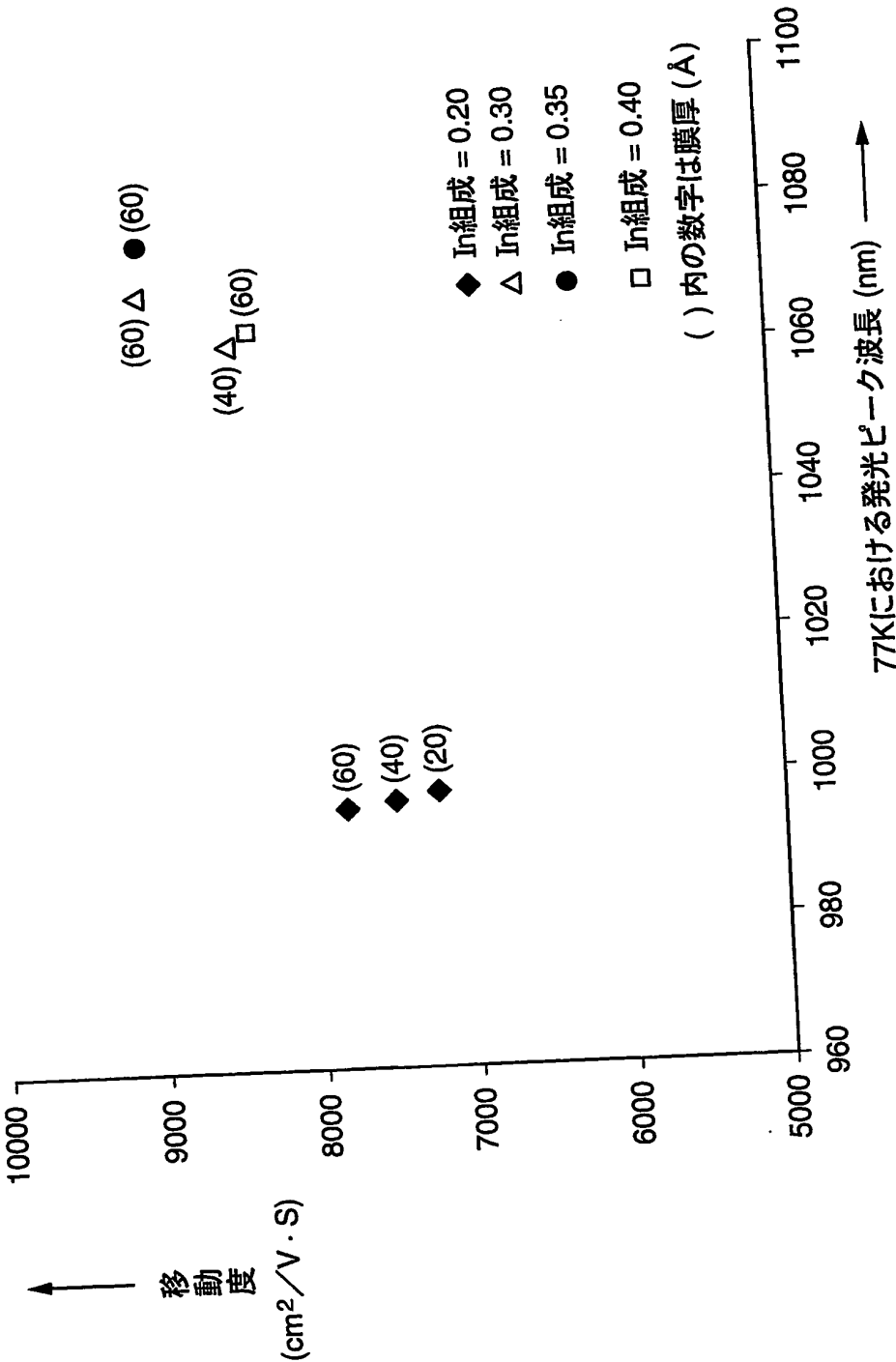


FIG. 2



3/6

FIG. 3

i- GaAs 20nm	~24
i- Al _{0.22} Ga _{0.78} As 3nm	~23
n- Al _{0.24} Ga _{0.76} As 10nm 3E18/cm ³	~22
i- Al _{0.24} Ga _{0.76} As 3nm	~21
i-GaAs 6nm	~20
i- In _{0.30} Ga _{0.70} As 7.5nm	~19
i-GaAs 6nm	~18
i- Al _{0.24} Ga _{0.76} As 3nm	~17
n- Al _{0.24} Ga _{0.76} As 4nm 3E18/cm ³	~16
i-Al _{0.25} Ga _{0.75} As 200nm	~15
i-GaAs 250nm	~14
i-Al _{0.25} Ga _{0.75} As 250nm	~13
i-GaAs 200nm	~12
GaAs 基板	~11

4/6

FIG. 4

i- GaAs 20nm	~24
i- Al _{0.22} Ga _{0.78} As 3nm	~23
n- Al _{0.24} Ga _{0.76} As 10nm 3E18/cm ³	~22
i- Al _{0.24} Ga _{0.76} As 3nm	~21
i-GaAs 6nm	~20
i- In _{0.85} Ga _{0.65} As 5.5nm	~31
i-GaAs 6nm	~18
i- Al _{0.24} Ga _{0.76} As 3nm	~17
n- Al _{0.24} Ga _{0.76} As 4nm 3E18/cm ³	~16
i-Al _{0.25} Ga _{0.75} As 200nm	~15
i-GaAs 250nm	~14
i-Al _{0.25} Ga _{0.75} As 250nm	~13
i-GaAs 200nm	~12
GaAs 基板	~11

FIG. 5

i- GaAs 20nm	~ 24
i- Al _{0.22} Ga _{0.78} As 7nm	~ 23A
n- Al _{0.24} Ga _{0.76} As 10nm 3E18/cm ³	~ 22
i- Al _{0.24} Ga _{0.76} As 3nm	~ 21
i- GaAs 2nm	~ 20A
i- In _{0.20} Ga _{0.80} As 13.5nm	~ 19A
i- GaAs 2nm	~ 18A
i- Al _{0.24} Ga _{0.76} As 3nm	~ 17
n- Al _{0.24} Ga _{0.76} As 4nm 3E18/cm ³	~ 16
i- Al _{0.25} Ga _{0.75} As 200nm	~ 15
i- GaAs 250nm	~ 14
i- Al _{0.25} Ga _{0.75} As 250nm	~ 13
i- GaAs 200nm	~ 12
GaAs 基板	~ 11

6/6

FIG. 6

i- GaAs 20nm	24
i- Al _{0.22} Ga _{0.78} As 7nm	23A
n- Al _{0.24} Ga _{0.76} As 10nm 3E18/cm ³	22
i- Al _{0.24} Ga _{0.76} As 3nm	21
i- GaAs 6nm	20
i- In _{0.20} Ga _{0.80} As 13.5nm	31A
i- GaAs 6nm	18
i- Al _{0.24} Ga _{0.76} As 3nm	17
n- Al _{0.24} Ga _{0.76} As 4nm 3E18/cm ³	16
i- Al _{0.25} Ga _{0.75} As 200nm	15
i- GaAs 250nm	14
i- Al _{0.25} Ga _{0.75} As 250nm	13
i- GaAs 200nm	12
GaAs 基板	11

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/JP03/16393

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER
Int.Cl.⁷ H01L29/778, H01L29/812, H01L29/201, H01L21/338, H01L21/205

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)
Int.Cl.⁷ H01L29/778-29/812, H01L29/201-29/205, H01L21/338,
H01L21/20-21/205

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched
Jitsuyo Shinan Koho 1922-1996 Jitsuyo Shinan Toroku Koho 1996-2004
Kokai Jitsuyo Shinan Koho 1971-2004 Toroku Jitsuyo Shinan Koho 1994-2004

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)
Web of Science

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X Y	Feng Zhao et al., 'Hall and photoluminescence studies of effects of the thickness of an additional $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ layer in the center of $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}/\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{As}/\text{GaAs}$ high electron mobility transistors', Materials Science in Semiconductor processing, Vol.5, February, 2002, pages 23 to 26	1 2-5
Y	JP 6-163599 A (NEC Corp.), 10 June, 1994 (10.06.94), Full text; Figs. 1 to 3 (Family: none)	2-3
Y	U. Strauß et al., 'Carrier mobilities in graded $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ quantum wells for high electron mobility transistors', Journal of Applied Physics, Vol.80, No.1, 01 July, 1996 (01.07.96), pages 322 to 325	4

☒ Further documents are listed in the continuation of Box C. ☐ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:
"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance
"E" earlier document but published on or after the international filing date
"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)
"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means
"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"I" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art
"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search
15 March, 2004 (15.03.04)

Date of mailing of the international search report
30 March, 2004 (30.03.04)

Name and mailing address of the ISA/
Japanese Patent Office

Authorized officer

Facsimile No.

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP03/16393

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	JP 6-84959 A (Fujitsu Ltd.), 25 March, 1994 (25.03.94), Full text; Figs. 1 to 9 (Family: none)	4
Y	JP 2001-210819 A (Hitachi Cable, Ltd.), 03 August, 2001 (03.08.01), Full text; Figs. 1 to 4 (Family: none)	5

国際調査報告

国際出願番号 PCT/JPO3/16393

A. 発明の属する分野の分類 (国際特許分類 (IPC))

Int. Cl⁷ H01L29/778, H01L29/812, H01L29/201,
H01L21/338, H01L21/205

B. 調査を行った分野

調査を行った最小限資料 (国際特許分類 (IPC))

Int. Cl⁷ H01L29/778-29/812, H01L29/201-29/205,
H01L21/338, H01L21/20-21/205

最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの

日本国実用新案公報	1922-1996年
日本国公開実用新案公報	1971-2004年
日本国実用新案登録公報	1996-2004年
日本国登録実用新案公報	1994-2004年

国際調査で使用した電子データベース (データベースの名称、調査に使用した用語)
Web of Science

C. 関連すると認められる文献

引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求の範囲の番号
X Y	Feng Zhao et.al., 'Hall and photoluminescence studies of effects of the thickness of an additional In _{0.3} Ga _{0.7} As layer in the center of In _{0.15} Ga _{0.85} As/Al _{0.25} Ga _{0.75} As/GaAs high electron mobility transistors', Materials Science in Semiconductor Processing, Vol.5, February 2002, p.23-26	1 2-5
Y	JP 6-163599 A (日本電気株式会社) 1994.06.10, 全文, 第1-3図 (ファミリーなし)	2-3

☒ C欄の続きにも文献が列举されている。☐ パテントファミリーに関する別紙を参照。

* 引用文献のカテゴリー

- 「A」 特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの
「E」 国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの
「L」 優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献 (理由を付す)
「O」 口頭による開示、使用、展示等に言及する文献
「P」 国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願

- の日の後に公表された文献
「T」 国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と矛盾するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの
「X」 特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの
「Y」 特に関連のある文献であって、当該文献と他の1以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの
「&」 同一パテントファミリー文献

国際調査を完了した日

15.03.2004

国際調査報告の発送日

30.3.2004

国際調査機関の名称及びあて先

日本国特許庁 (ISA/JP)
郵便番号100-8915
東京都千代田区霞が関三丁目4番3号

特許庁審査官 (権限のある職員)
洲 真悟

4L 2933

電話番号 03-3581-1101 内線 3496

C (続き). 関連すると認められる文献		関連する 請求の範囲の番号
引用文献の カテゴリ*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	
Y	U. Strauß et.al., 'Carrier mobilities in graded In _x Ga _{1-x} As/Al _{0.2} Ga _{0.8} As quantum wells for high electron mobility transistors', Journal of Applied Physics, Vol.80, No. 1, 1 July 1996, p.322-325	4
Y	J P 6-84959 A (富士通株式会社) 1994.03.25, 全文, 第1-9図 (ファミリーなし)	4
Y	J P 2001-210819 A (日立電線株式会社) 2001.08.03, 全文, 第1-4図 (ファミリーなし)	5